

# Mechatronik und Zustandsüberwachung in Schienenfahrzeug-Fahrwerken

Kraft, Dietmar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bombardier Transportation Zürich

## 1 Einleitung

Noch vor rund 20 Jahren waren Neigetechnik- und Gleitschutzsysteme sowie Geschwindigkeitssensoren die einzigen mechatronischen Ausrüstungen bzw. Zustandsüberwachungssysteme in Schienenfahrzeug-Fahrwerken. Analog zum Automobilbereich nimmt in jüngster Zeit der Einsatz von mechatronischen Komponenten und Zustandsüberwachungssystemen auch im Bereich der Schienenfahrzeug-Fahrwerke zu. Der Artikel beschreibt anhand ausgewählter Beispiele Entwicklungslinien und Anwendungsstand aus Sicht eines Fahrwerkherstellers, der vor rund 20 Jahren damit begonnen hat, mechatronische Ausrüstungen zu entwickeln. Die Beispiele wurden so gewählt, dass sich wesentliche Entwicklungsschritte und ihre Hintergründe nachvollziehen lassen.

## 2 Entwicklungslinien der Neigetechnik

Neigetechnik dient dazu, den Wagenkasten in Gleisbögen nach bogeninnen zu neigen, um die auf den Fahrgast wirkende Fliehkraft zu verringern und somit höhere Fahrgeschwindigkeiten in Bögen zu ermöglichen.

Dies kann wie beim Prinzip der Talgo-Züge rein passiv erfolgen, siehe erstes Teilbild in Abbildung 1. Ein solches System ist einfach und kostengünstig. Allerdings lassen sich auf diese Weise nur Neigewinkel von rund  $4^\circ$  erzeugen. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Neigung allein aus dem wirkenden Kräftespiel resultiert. Ein Eingriff in dieses Kräftespiel, z.B. ein vorausschauendes Neigen, ist mit einem passiven System nicht möglich.

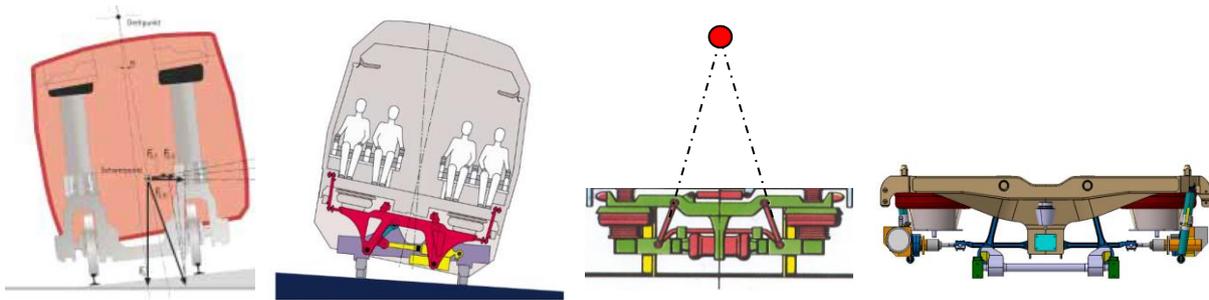


Abbildung 1: Entwicklungslinie der Neigetechnik, von links nach rechts: Talgo (passiv); aktive Neigetechnik; Neiko (passiv mit Energiespeicher), WAKO (aktiv)

Das zweite Teilbild in Abbildung 1 zeigt ein Beispiel einer aktiven Neigetechnik. Zusätzlich zur Primär- und Sekundärfederstufe wird eine Neigestufe über oder, wie im Beispiel gezeigt, unter der Sekundärstufe eingeführt. Die Neigung wird mit Aktuatoren erzeugt. Gegenüber der passiven Lösung werden mit einem solchen System Neigewinkel bis zu  $8^\circ$  erreicht und dank der Aktuatoren mit zugehöriger Steuerung unterliegt die Neigefunktion nicht nur dem wirkenden Kräftespiel, sondern kann beeinflusst werden. Erkauft werden diese Vorteile mit einem erhöhten Realisierungsaufwand.

Mit dem System Neiko der Firma SIG (heute Alstom) (drittes Teilbild in Abbildung 1) verringert sich der Aufwand: Das Neigen erfolgt ohne zusätzliche Neigestufe innerhalb der Sekundärstufe, indem mittels schräggestellter Wankstützpendel ein hochliegender Drehpol erzeugt wird, um den der Wagenkasten um seine Längsachse pendeln kann. Wie bei der Talgo-Lösung beginnt das Neigen des Wagenkastens aufgrund des wirkenden Kräftespiels. Zum Einsatz kommt aber zusätzlich eine quer eingebaute Luftfeder mit degressiver Kennlinie, die die passive Neigebewegung des Wagenkastens unterstützt. Da keine Energie von außen zugeführt wird, handelt es sich nach wie vor um ein passives System, jedoch bildet die Luftfeder mit degressiver Kennlinie einen Energiespeicher. Da die geneigten Wankstützpendel die Sekundärstufe in Querrichtung versteifen und somit den Fahrkomfort verschlechtern, wurden oberhalb der Drehgestelltraverse Gummielemente vorgesehen, die vertikal steif und quer weich sind.

Basierend auf Neiko hat Bombardier mit dem Ziel, auch doppelstöckigen Fahrzeugen höhere Fahrgeschwindigkeiten im Bogen zu ermöglichen, die Wankkompensation **BOMBARDIER WAKO** entwickelt (viertes Teilbild in Abbildung 1). **WAKO** basiert wie Neiko auf schräg stehenden Wankstützpendel in der Sekundärstufe. Anstelle der querliegenden Luftfedern mit degressiver Kennlinie kommen jedoch Aktuatoren zum Einsatz, d.h. es handelt sich um ein aktives System. Die Aktuatoren erfüllen zwei verschiedene Funktio-

nen: Im niederfrequenten Bereich sorgen sie für das Neigen des Wagenkastens, im höherfrequenten Bereich regeln sie den Fahrkomfort in Querrichtung (ALS=Active lateral suspension). Dank dieser Regelung kann auf die zusätzlichen Neiko-Gummifedern oberhalb der Drehgestelltraverse verzichtet werden, was bei der Doppelstockanwendung aus Bauraumgründen notwendig ist. Mit einem Neigewinkel von ca.  $1-2^\circ$  können dank WAKO auch Doppelstockzüge in Bögen schneller fahren. Anhand dieser Lösung zeigt sich exemplarisch eine Grundidee von mechatronischen Lösungen: Ein aktiv geregeltes System kann Funktionen erfüllen, die sonst nur mit zusätzlicher Hardware möglich wären. Der anfangs trotz Erfüllung der Anforderungen kritisierte Fahrkomfort in Querrichtung konnte im Laufe einer Optimierungskampagne allein durch Anpassung der Regelung ohne Änderung von Hardware noch einmal deutlich verbessert werden. Auch dies unterstreicht das Wesen eines mechatronischen Systems.

Die ALS-Funktionalität der Aktuatoren kann auch als eigenständiges System eingesetzt werden (z.B. bei hohen Komfortanforderungen oder reduzierten Querwegen). Im einstöckigen Zefiro Hochgeschwindigkeitszug, der von Hitachi und Bombardier gemeinsam für die italienische Staatsbahn FS geliefert wird, ist dies der Fall. Hier wirken die Aktuatoren zugleich als hold-off device, d.h. sie bringen quasistatische Querkräfte auf, die ein Anschlagen des Wagenkastens an die Querpuffer bei großen Querbeschleunigungen und somit eine Fahrkomforteinbuße in Querrichtung vermeiden. Mit weitgehend identischer Aktuator Hardware lassen sich allein durch geänderte Ansteuerungssoftware also die verschiedenen Funktionen Wankkompensation/Neigen, Querkomfortregelung und Hold-off device realisieren. Auch dies ist ein Beispiel für die Vorteile der Mechatronik.

### 3 Entwicklungslinien der Radsatzsteuerung

Radsatzsteuerungen dienen zur Verschleißminimierung von Rad und Schiene im Bogen. Positive Begleiteffekte sind reduzierter Fahrwiderstand und somit geringerer Energieverbrauch, eine gleichmäßigere Verteilung der Querkräfte auf die Radsätze, verringertes Risiko für Materialermüdung an Rad und Schiene (Rail Contact Fatigue RCF) und Vermeidung von Kurvenkreischen. Fast seit Anbeginn der Eisenbahn sind mechanische Radsatzsteuerungen entwickelt und eingesetzt worden. Diese lassen sich fast ausnahmslos in die folgenden Grundprinzipien aufteilen:

- Weiche Radsatzführung (Nutzen der Selbsteinstellungsfähigkeit des Radsatzes)
- Kreuzkopplung von Radsätzen innerhalb des Drehgestells
- Kreuzkopplung von Drehgestellen innerhalb eines Fahrzeugs
- Steuern der beiden äußeren Radsätze im dreiachsigen Drehgestell durch die Querbewegung des mittleren Radsatzes im Gleisbogen

- Steuern der Radsätze über den Ausdrehwinkel zwischen Drehgestell und Wagenkasten
- Unterstützen der Ausdrehbewegung des Drehgestells durch Hilfskräfte (aktive Schlingerdämpfer)
- Steuern der Fahrwerke oder Radsätze über den Knickwinkel der Wagenkästen im Gleisbogen

Die mechanischen Lösungen können jedoch unter anderem folgende Nachteile aufweisen:

- Aufwändige, schwere Mechanik
- Feste Übersetzungsverhältnisse, die nicht für alle Bedingungen ideal sind und sich nicht übersteuern lassen
- Bei vielen Lösungen wird das führende Fahrwerk im Zug zu spät gelenkt
- Weitgehend korrektes Einstellen meist nur im Vollbogen (unvollständiges oder gar fehlerhaftes Einstellen im Übergangs- oder S-Bogen)
- Die mechanischen Kopplungen (je nach System vom Radsatz zum Wagenkasten) können Vibrationen in den Wagenkästen übertragen

### 3.1 Von der passiven zur aktiven Knickwinkelsteuerung

Abbildung 2 zeigt beispielhaft eine Entwicklungslinie von mechanischen Lösungen hin zur Mechatronik. Die Talgo-Züge (Abbildung 2 links) weisen eine passive mechanische Kopplung auf, die den Knickwinkel zwischen zwei Wagenkästen über eine Lemniskate auf die Fahrwerke überträgt. Bei dieser einfachen Lösung besteht eine direkte mechanische Kopplung zwischen Wagenkasten und Radsatzlagern.

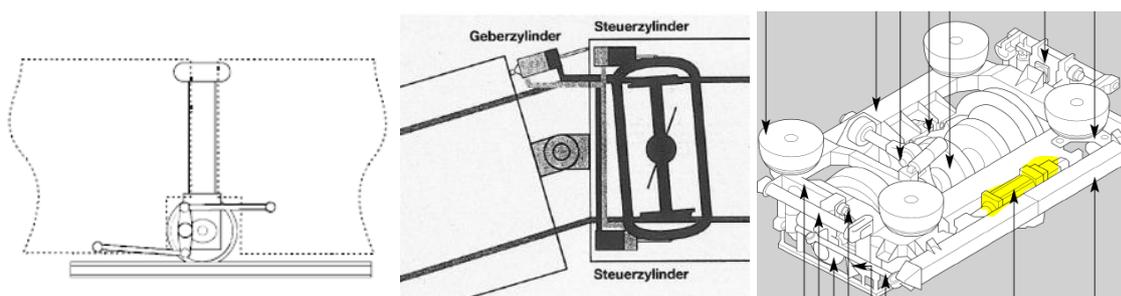


Abbildung 2: Entwicklungslinie Radsatzsteuerung über Wagenkastenknickwinkel, von links: Talgoprinzip (passiv) [1]; KERF Kopenhagen Alstom/LHB (passiv) [2], Jenbacher Integral (aktiv) aus [3]

Für die S-Bahn in Kopenhagen hat LHB (heute Alstom) ebenfalls eine passive, kastengesteuerte Lösung (KERF = kurvengesteuerte Einzelradsatz-Fahrwerke) für die Einstellung der Einzelachs-fahrwerke realisiert (zweites Teilbild in Abbildung 2): In diesem Fall wird

der Knickwinkel zwischen den Wagenkästen nicht mechanisch, sondern hydraulisch auf die Fahrwerke übertragen. Zudem werden nicht die Radsätze direkt gesteuert, sondern die Fahrwerksrahmen, d.h. relativ zum «vorgesteuerten» Fahrwerksrahmen können sich die Radsätze noch selbsttätig einstellen. Die Steuerung kann daher auch als «Nachführung der Primärstufe» angesehen werden.

Den Übergang zur Mechatronik bei gleichem Grundprinzip tätigte die Firma Jenbacher in ihren Integral-Zügen. Hier wird der Knickwinkel zwischen den Wagenkästen im Gleisbogen mit Wegaufnehmern gemessen und die Einstellung der Fahrwerke erfolgt mit quer angeordneten hydraulischen Zylindern, siehe gelb hervorgehoben im dritten Teilbild von Abbildung 2. Im Gegensatz zu den passiven Lösungen von Talgo und LHB handelt es sich um eine aktive Lösung, da die Kräfte über Aktuatoren und nicht vom mechanischen System selbst bereitgestellt werden. Außerdem bestände die Möglichkeit, zum Beispiel unter Nutzung von anderen Sensorsignalen, die Wirkweise zu verändern (z.B. fahrgeschwindigkeitsabhängige Aktuatorkräfte). So etwas wäre bei den mechanischen Lösungen nicht möglich.

### **3.2 Von der aktiven zur semi-aktiven Radsatzsteuerung**

2003 hat Bombardier eine aktive Radsatzsteuerung (ARS) entwickelt und auf dem Rollprüfstand getestet. Später wurde das System im sogenannten Grünen Zug in Schweden während 6 Monaten testweise eingesetzt. Am 18.07.2007 fuhr dieser Zug mit ARS einen schwedischen Geschwindigkeitsrekord von 282 km/h. Mit dem System wurden deutlich verringerte Rad/Schiene-Querkräfte gemessen. Es kamen pro Drehgestell zwei elektromechanische Aktuatoren zum Einsatz, die jeweils ein Radsatzende in Längsrichtung verschieben konnten. Die Anlenkung vom Aktuator auf die Radsatzlager erfolgte über Blattlenker, Abbildung 3. ARS sorgte im niederfrequenten Bereich für die Radialeinstellung und im höherfrequenten Bereich für die Stabilisierung des Radsatzes. Dank dieser Stabilisierung konnte selbst bei 250 km/h auf Schlingerdämpfer verzichtet werden.



*Abbildung 3: ARS Drehgestell im Grünen Zug in Schweden, 2007*

In der Folge wurde ARS durch Bombardier mit dem Ziel einer Kostenreduktion weiterentwickelt, indem unter anderem elektrohydraulische Aktuatoren vorgesehen wurden. Das modifizierte ARS wurde im Rahmen von Prototypstfahrten für den Fernverkehrs-Doppelstockzug FV Dosto der SBB mit Wankkompensation erfolgreich getestet [4]. Mit der Einführung von Trassenpreismodellen, die die Bogenfreundlichkeit von Fahrwerken belohnen, haben sich in jüngerer Zeit die Voraussetzungen für einen erfolgreichen business case von ARS in einigen Ländern verbessert.

Mit den sogenannten hydraulischen Achslenkerlagern (HALL), Abbildung 4, kamen jüngst passive Systeme mit günstigen Anschaffungskosten auf den Markt. Die HALL-Lager sind so konstruiert, dass sie auch nachträglich im gleichen Bauraum wie übliche Achslenkerlager eingebaut werden können. Somit ist eine einfache Nachrüstung existierender Fahrzeuge möglich. Die HALL-Lager weisen intern einen hydraulischen Kreislauf auf, der dafür sorgt, dass die Längssteifigkeit der Lager für niederfrequente Bewegungen gering und für hochfrequente Bewegungen hoch ist, Abbildung 4. Auf diese Weise wird die niederfrequente Selbststeuerung des Radsatzes im Bogen ermöglicht, hochfrequente Schlingerbewegungen des Radsatzes jedoch unterdrückt. Vor allem bei den SBB in der Schweiz wurden in den letzten Jahren bereits zahlreiche Fahrzeuge auf HALL-Lager umgerüstet. Bei Auftreten von Antriebs- oder Bremskräften bewegen sich die Radsätze jedoch gegen die geringe niederfrequente Längssteifigkeit in Richtung der internen Längsanschläge. Dadurch wird die Wirkung der Selbsteinstellung eingeschränkt.

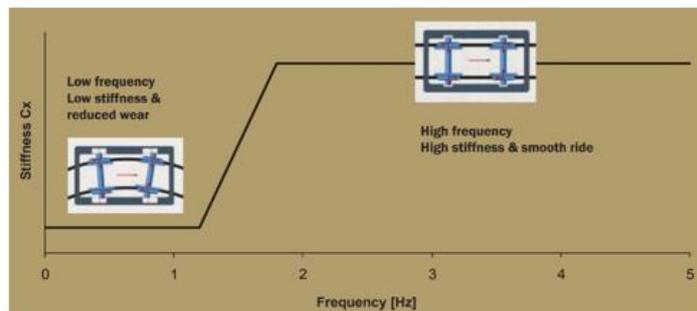


Abbildung 4: Hydraulisches Achslenkerlager, Quelle: Trelleborg

Bombardier setzt verschiedene Drehgestelltypen ein, die in der Primärstufe kein Achslenkerlager, sondern Gummifederelemente, sogenannte Rahmenstützlager, verwenden. Um auch bei solchen Drehgestellkonstruktionen das HALL-Prinzip nutzen zu können, hat Bombardier gemeinsam mit der Firma Trelleborg das sogenannte *BOMBARDIER FLEXX*® Curve Primärfederelement entwickelt, Abbildung 5.

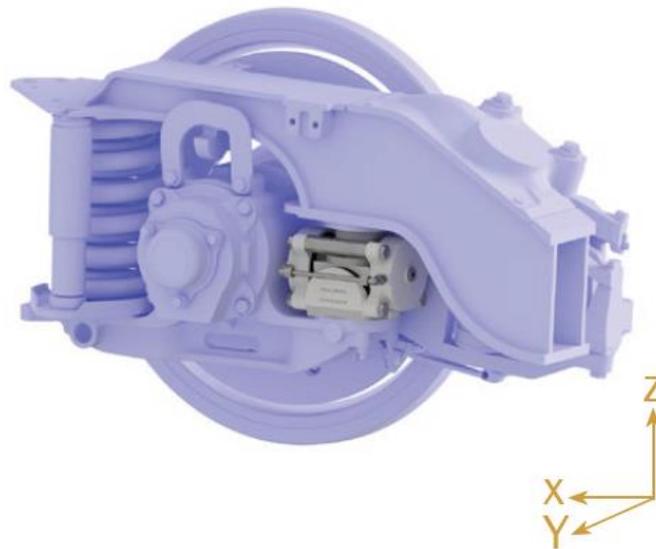


Abbildung 5: *FLEXX® Curve in der Primärfederstufe integriert, Quelle: Trelleborg*

Die Wirkung entspricht derjenigen der HALL-Lager, allerdings können die Elemente auch große Vertikalkräfte, wie sie in den entsprechenden Drehgestellen am Rahmenstütz-lager auftreten, aufnehmen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das linke und das rechte Element eines Radsatzes hydraulisch miteinander zu verbinden. Damit bieten sich folgende vier performancemäßig unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten einer Radsatzsteuerung:

- Passiv: Linkes und rechtes *FLEXX® Curve* Element nicht gekoppelt
- Passiv, gekoppelt: Linkes und rechtes *FLEXX® Curve* Element hydraulisch gekoppelt (dank der hydraulischen Kopplung bleibt die Selbststeuerungsfähigkeit des Radsatzes auch unter Zug- und Bremskräften erhalten)
- Semi-aktiv, gekoppelt: In der hydraulischen Kopplung zwischen den beiden *FLEXX® Curve* Elementen eines Radsatzes sind schaltbare Ventile angeordnet, Bild 6. Die Ventile lassen wie bei einer Chopper-Steuerung nur Radsatzbewegungen in Richtung Radialstellung zu, gegensinnige Ausdrehbewegungen des Radsatzes werden unterbunden. Durch den Wellenlauf und Schwingungsbewegungen des Radsatzes erfolgt eine semi-aktive Radialsteuerung, Bild 7 und [5]
- Aktiv, gekoppelt: In der hydraulischen Kopplung zwischen den beiden *FLEXX® Curve* Elementen eines Radsatzes sind Pumpen als Aktuatoren angeordnet

Die semi-aktive Variante liegt von der Radialsteuerungs-Performance her unterhalb derer einer vollwertigen ARS-Lösung, ist jedoch von den Kosten her attraktiv. Nach erfolgreichen Prüfstandsversuchen startet in Kürze die Praxiserprobung.

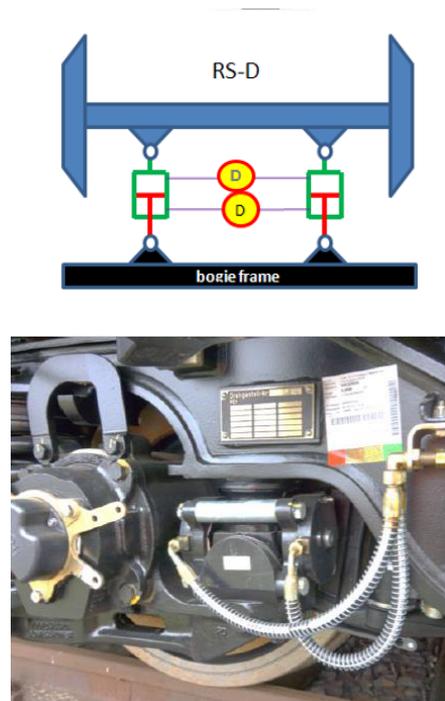


Abbildung 6: Hydraulische Kopplung der FLEXX® Curve Elemente mit gesteuerten Ventilen (D)

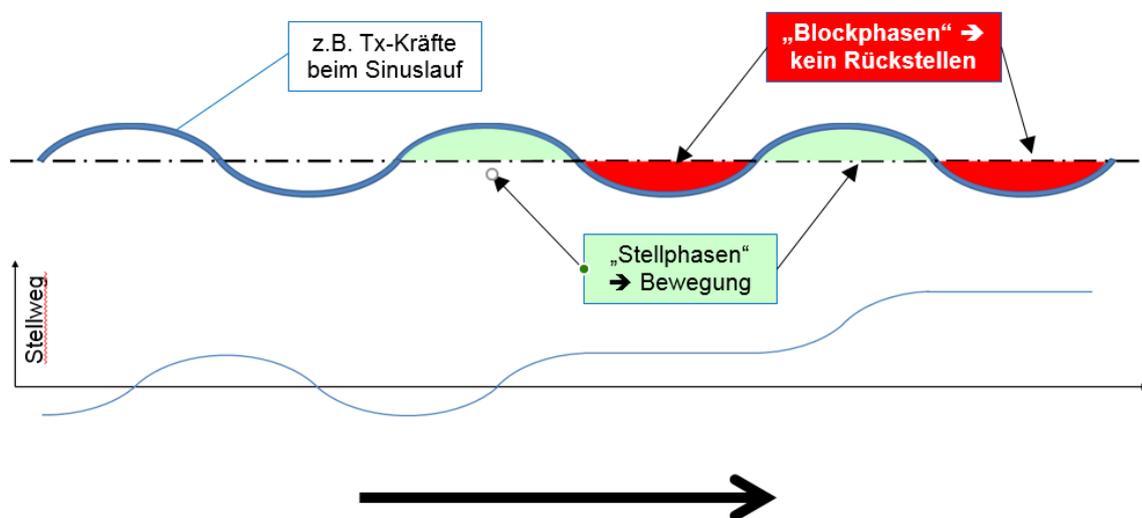


Abbildung 7: Wirkungsweise der semi-aktiven Radsatzsteuerung mit gesteuerten Ventilen

## 4 Zustandsüberwachung von Fahrwerken

In jüngster Zeit gewinnt die Zustandsüberwachung von Fahrwerken, sei es on-board oder stationär, an Bedeutung. Zu unterscheiden ist zwischen:

- Systemen, die den Betrieb absichern (Sicherstellung gesetzlicher oder technischer Sicherheitsvorgaben):
  - Überwachung von Lagertemperaturen
  - Überwachung der Fahrstabilität (IMS=Instability Monitoring System)
  - Überwachung von Neige- und Wankkompensationssystemen
  - Erkennen von Entgleisungen

Diese Systeme sind in der Regel als sicherheitskritisch eingestuft, d.h. es müssen gewisse SIL-Level eingehalten werden.

- Systemen, die den Unterhalt unterstützen (z.B. verlängerte Lebensdauer), z.B.:
  - Überwachung von Lagern (Radsatz-, Fahrmotor-, Getriebelager)
  - Überwachung von primärer und vertikaler Federstufe
  - Erfassen von Radschäden (z.B. Flachstellen)

Den vollen Nutzen erzielen solche Systeme erst dann, wenn sie nicht nur den Ausfall von Komponenten (z.B. Lagerschäden) feststellen, sondern bereits frühzeitig einen sich anbahnenden Ausfall ankündigen. Dies erlaubt den Übergang von festen Wartungsintervallen zu einem zustandsbasierten Unterhalt («condition based maintenance»), was ein großes Einsparpotential verspricht. Wenn die Systeme zudem die Restlebensdauer geschädigter Elemente bestimmen können, kann der Termin der notwendigen Wartungsmassnahme vorherbestimmt werden und die Fahrzeuge können bis dahin im Betrieb bleiben («predictive maintenance»).

Die Sensoren sowie die Speichermedien für die erfassten Daten bzw. Sendeeinrichtungen, die die Daten vom Fahrzeug an eine ortsfeste Einrichtung senden, benötigen in der Regel eine elektrische Spannungsversorgung. Bei Personenzügen ist dies gegeben. Außerdem besteht bei modernen Personenzügen häufig bereits die Möglichkeit zum Versenden von Daten. Im Güterverkehr sind diese Voraussetzungen nicht gegeben. Hier müssen entweder Batterien für die Spannungsversorgung oder Systeme zum «Energy Harvesting» eingesetzt werden. Letztere erzeugen z.B. aus der Schwingungsenergie der Fahrzeuge elektrische Spannung. Aber auch für den Einsatz im Personenverkehr könnten solche energieautarken Lösungen langfristig interessant werden, da dadurch kabellose Sensoren realisierbar werden, was den Montagaaufwand am Fahrwerk reduzieren würde.

Abbildung 8 zeigt das Beispiel einer Zustandsüberwachung der Radsatzlager bei einer Flotte von 50 Zügen unter Verwendung eines Lagerindicators nach dem Ampelfarben-Prinzip. Die Züge wurden nach und nach entsprechend ihrer Zugnummer (von 1 bis 50) in den Betrieb genommen. Es wird deutlich sichtbar, dass die ältesten Züge der Flotte schlechtere Indikatorwerte aufweisen als die jüngsten Züge.

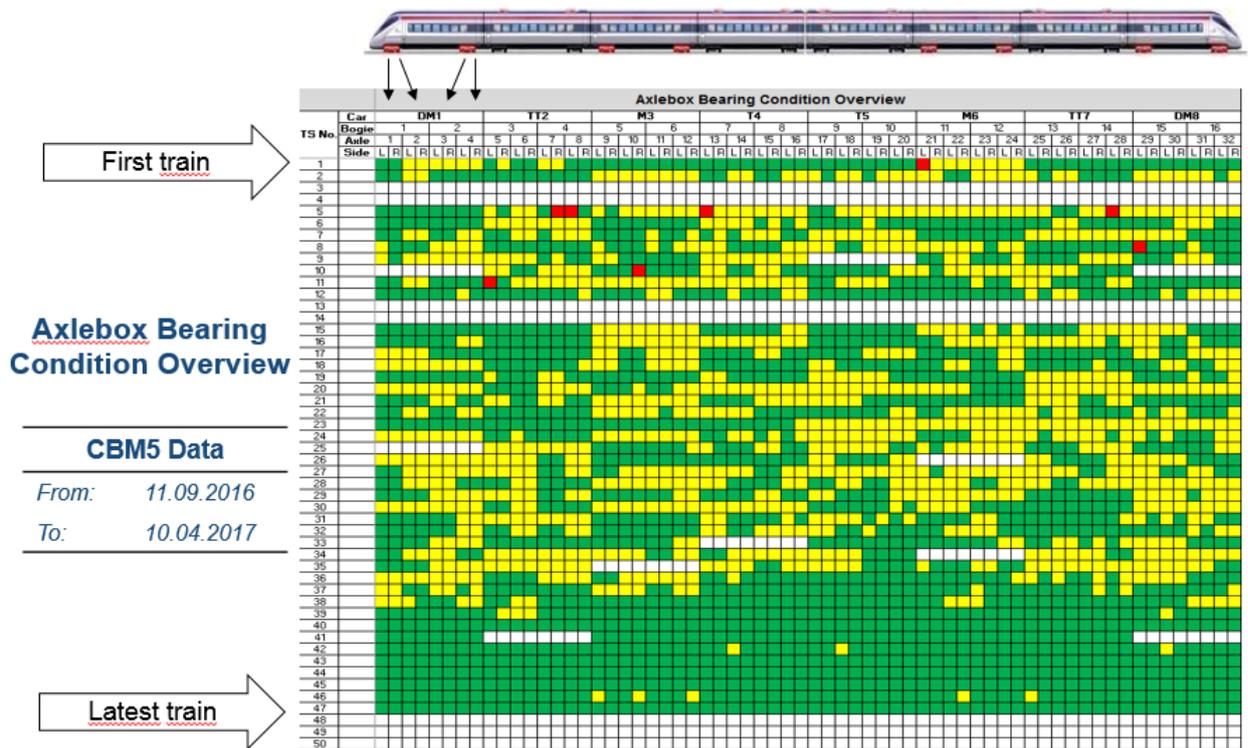


Abbildung 8: Beispiel für eine Auswertung der Achslager-Zustandsüberwachung für eine Zugflotte aus 50 Zügen (Lagerindikator: grün=Lager ohne Befund, gelb=Lager mit beginnendem Befund, rot=Lager mit deutlichem Befund)

Nachteilig bei permanenter on-board Zustandsüberwachung kann die hohe Anzahl an erforderlichen Sensoren sein, die z.B. zur Überwachung aller Radsatzlager eines Zuges benötigt wird. Daher bieten sich folgende Alternativen an:

- Mobile Systeme zur Lagerüberwachung (für unbemanntes, zeitlich begrenztes Datensammeln unter Verwendung der bewährten Bausteine der permanenten on-board-Systeme, aber zu stark reduzierten Anschaffungskosten)
- Ortsfeste Systeme (z.B. eine einzelne Anlage vor der Einfahrt in das Depot zur flottenweiten Überwachung von Rädern und Achslagern)

On-board Zustandsüberwachungssysteme lassen sich kostengünstig quasi «nebenbei» realisieren, wenn ohnehin für ein Steuerungssystem (z.B. eine aktive Querfederung) bereits viele Sensoren auf dem Fahrzeug verfügbar sind.

## **5 Zustandsüberwachung der Fahrbahn mit Regelzügen**

Immer mehr Betreiber nutzen Sensorik auf Regelzügen im täglichen Betriebseinsatz zur Überwachung des Gleiszustandes. Zeigen sich in den Signalen punktuelle Störstellen oder generell eine Verschlechterungstendenz der Fahrbahn, kann der Netzbetreiber gezielt eine Überarbeitung des Gleises vornehmen, Abbildung 9.

Der Einsatz von speziellen Gleismesszügen kann dank dieser Systeme reduziert oder sogar überflüssig gemacht werden. Bei integrierten Bahnen ist die Einführung solcher Systeme einfacher möglich als bei Bahnen mit getrennten Verantwortlichkeiten für Infrastruktur und Fahrzeuge, denn im letzteren Fall fallen die Mehrkosten der Fahrbahnüberwachungssysteme bei den Fahrzeugbesitzern an, der Benefit jedoch bei den Infrastrukturbetreibern. In diesem Fall müssten neuartige Geschäftsmodelle zum Tragen kommen, bei denen der Fahrzeugbetreiber die gesammelten Gleisdaten an den Infrastrukturbetreiber verkauft oder dafür eine Trassenpreisreduktion erhält.

Die Gleislagedaten können aber auch für den Fahrwerkshersteller bei der Bewertung von Konsequenzen auf die Lebensdauer von Fahrwerkkomponenten genutzt werden. Drehgestellrahmen werden zum Beispiel für bestimmte Torsionsbelastungen, die aus Gleisverwindungen resultieren, ausgelegt. Wenn die Gleisverwindungen im Netz dank der Fahrbahn-Zustandsüberwachungssysteme permanent gemessen werden, lassen sich die Einhaltung der Auslegungskriterien überwachen und bei Überschreiten Aussagen zur Restlebensdauer ableiten. Der Vorteil gegenüber Gleismessfahrzeugen besteht zudem darin, dass die Auswirkungen unter den realen Radlasten und auf das spezifische Fahrwerkskonzept bezogen erfasst werden.



Abbildung 9: Gleislagefehler, die mit Fahrbahn-Zustandsüberwachungssystemen erfasst werden können (links oben: Schienenstöße und -lücken, rechts oben: vertikale Gleislageabweichungen, links unten: Schienenriffel, rechts unten (Quelle: [https://www.atsb.gov.au/media/4260904/ro2013012\\_fig6.jpg](https://www.atsb.gov.au/media/4260904/ro2013012_fig6.jpg)): Gleisverwindungen)

Neben der Gleisverwindung lassen sich mit solchen Systemen in der Regel über Beschleunigungsmessungen z.B. horizontale und vertikale Gleislagefehler, der Schwingkomfort im Fahrzeug, aber auch Schienenriffel und Schienenstöße detektieren. Für den gezielten Gleisunterhalt ist eine möglichst präzise Verortung z.B. durch GPS erforderlich. In engen Straßenschluchten oder Tunneln ohne GPS-Empfang müssen die fehlenden GPS-Signale mit anderen Methoden ergänzt werden (z.B. Streckendateien in Kombination mit Wegmessung).

Aufgrund ihrer Robustheit und Zuverlässigkeit, basieren die Systeme in der Regel auf Beschleunigungs- und Drehratengebern, Abbildung 10. Mit diesen Gebern lassen sich zahlreiche Gleisparameter erfassen. Nicht möglich ist mit diesen Sensoren das Messen der Spurweite und das Erfassen der Schienenprofile. Hierzu müssen Lasermesssysteme oder optische Bilderkennungssysteme zum Einsatz kommen. Einige Betreiber wie die Zentralbahn in der Schweiz sind bereits dazu übergegangen, im Regelzug, der zur Überwachung des Gleises dient, auch ein Lasersystem zu integrieren [6]. Da sich die Spurweite und die Schienenprofile nur langfristig verändern, könnte man daran denken, die empfindlichen Lasersysteme nur kampagnenweise zu montieren oder sie montiert zu lassen, ohne permanent zu messen.



Controller



GPS Antenne



Geschwindigkeitssensor



Wagenkastensensor



Achslagersensor mit Anschlusskabel

Abbildung 10: Ausrüstung für ein Fahrbahnüberwachungssystem (Beispiel)

## 6 Interdisziplinäre Herausforderungen

Bei mechatronischen Systemen sind naturgemäß verschiedene Disziplinen wie Mechanik, Elektrik, Elektronik und Softwareentwicklung beteiligt. Stärker als bei mechanischen Systemen erfordert die Entwicklung von mechatronischen Systemen daher einen interdisziplinären Ansatz mit gemischten Teams, in denen Mechaniker, Konstrukteure, Mechatroniker, Festigkeitsberechner, Fahrzeugdynamiker, Simulationsexperten, Verkabelungstechniker, Controllerentwickler, Software-Entwickler, Testingenieure, RAMS/LCC-Experten und Spezialisten für Datenanalyse und Big data eng zusammenarbeiten müssen. Zudem sind geeignete Testlabore im eigenen Haus von Vorteil.

## **7 Zusammenfassung**

Nachdem lange Zeit die Neigetechnik, Gleitschutz und Geschwindigkeitsgeber die einzigen mechatronischen Systeme bzw. Sensoren im Fahrwerksbereich waren, wurden in den letzten Jahren vermehrt mechatronische Systeme zur Fahrwerksteuerung (z.B. semi-aktive und aktive Radsatzsteuerung, Wankkompensation, aktive Querkomfortregelung etc.) entwickelt. Zudem kommen neuerdings Systeme zur Zustandsüberwachung von Fahrwerken (on-board Systeme und ortsfeste Anlagen) und Fahrbahn (Sensorik auf Regelfahrzeugen im Betrieb) zum Einsatz. Diese ermöglichen neue Formen der Instandhaltung von Fahrwerk und Gleis (zustandsbasiert oder sogar prädiktiv). Die genannten mechatronischen Systeme erhöhen zunächst die Kosten für die Beschaffung und Ausrüstung von Fahrzeugen, bieten aber langfristig Potential für Einsparungen im Unterhalt. Bei aktiven Radialsteuerungen hängt die erfolgreiche Einführung stark von Trassenpreismodellen ab, die bogenfreundliche Fahrwerke angemessen belohnen.

Es ist davon auszugehen, dass sich der Trend Richtung Mechatronik fortsetzen und verstärken wird. Grundvoraussetzung für die Entwicklung mechatronischer Systeme ist ein stark interdisziplinärer Ansatz.

## Literatur

- [1] Darballeira, J., Baeza, L., Rovira, A. and Garcia, E.  
Technical characteristics and dynamic modelling of Talgo trains  
Vehicle System Dynamics, Vol. 46 (supl1), S. 301-316, 2008
- [2] Dompke, T. and Brunnecker, U.  
S-Bahn-Triebzug Kopenhagen – innovatives Konzept für die Zukunft  
ZEV Glasers Annalen, Vol. 122(4), S. 125-137, 1998
- [3] Wei, Y.  
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaares für Straßenbahnen  
Dissertation  
Fakultät für Maschinenbau Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2014
- [4] Schneider, R.  
Trotz größerer Transportleistung gleisschonend in die Zukunft: Wankkompensation und aktive Radsatzsteuerung «*FLEXX® Tronic*» von Bombardier  
Eisenbahn-Revue International (2010) 4, S. 174-181
- [5] Brundisch, V.  
Die Passive Radsatz-Steuerung PRS – Ein Beitrag zur Schonung der Bahninfrastruktur  
ZEV rail 142 (2018) 4, S. 116-123
- [6] Gleisvermessung der Zentralbahn mit Regelzügen  
Eisenbahn-Revue (2019) 4, S. 188-190

## **Autoren**



### **Dr. Kraft, Dietmar**

Dietmar Kraft studierte bis 1992 Maschinenbau mit Vertiefungsrichtung Schienenfahrzeugtechnik an der RWTH Aachen. Anschließend war er Assistent am Institut für Fördertechnik und Schienenfahrzeuge (IFS) der RWTH Aachen, wo er 1998 promovierte. Seit 1998 arbeitet er in der Drehgestell- Entwicklung bei Bombardier Transportation Schweiz (bzw. Vorgängerfirmen), wo er in verschiedenen Bereichen tätig war (u.a. Fahrzeugdynamik, Messtechnik, Safety, Projekt- und Angebotsengineering, Produktmanagement). Aktuell ist Dietmar Kraft Produktmanager für Mechatronik.